

# 非平衡流砂モデルによる津波の海岸堤防越流時における局所洗掘現象の数値解析

梶川勇樹<sup>1</sup>・田中基<sup>2</sup>・黒岩正光<sup>1</sup>

## Numerical Analysis of Local Scour at the Toe of a Coastal Dike Induced by Tsunami Overflow Using a Non-Equilibrium Sediment Transport Model

Yuki KAJIKAWA<sup>1</sup>, Hajime TANAKA<sup>2</sup> and Masamitsu KUROIWA<sup>1</sup>

### Abstract

In this study, the applicability of a numerical model for the predicting of local scour at the downstream of a weir, which has been developed by the authors in the river field, to the local scour at the toe of a coastal dike induced by tsunami overflow was investigated. Furthermore, the influence of the difference between equilibrium and non-equilibrium bed load transport models on the reproducibility of the phenomenon was also examined. The results showed that the model was able to reproduce well both the tsunami overflow situation and the local scour progression with repeated flow regime transitions. Moreover, the non-equilibrium model reproduced a smooth scour shape extending from the top of the foundation as in the experiment, while the equilibrium model produced deep scour just below at the toe of the dike. In addition, it was also clarified that the coefficient of the suspended load formula had a significant effect on the reproduction of the phenomenon.

キーワード：津波越流，海岸堤防，局所洗掘，非平衡流砂，数値解析

Key words: tsunami overflow, coastal dike, local scour, non-equilibrium sediment transport, numerical analysis

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波では、東北地方4県（福島県、秋田県、宮城県、岩手県）における約300 kmの海岸堤防の

うち、190 kmの堤防について全壊あるいは半壊の被害が発生した<sup>1)</sup>。加藤ら<sup>2)</sup>の現地踏査に依れば、堤防被災の引き金となったその主要因は、津波の堤防越流に伴う裏法尻での局所洗掘の発生による

<sup>1</sup> 鳥取大学工学部社会システム土木系学科  
Department of Social Systems and Civil Engineering,  
Tottori University

<sup>2</sup> アサヒコンサルタント株式会社  
Asahi Consultants Co., Ltd

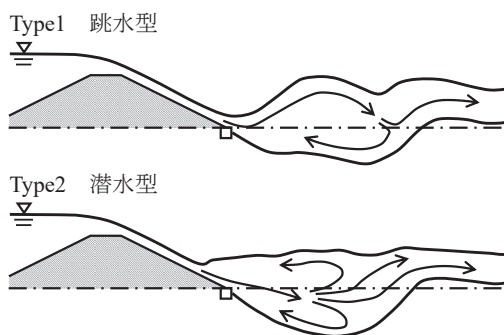


図1 海岸堤防裏法尻における洗掘時の流れの模式図<sup>5)</sup>

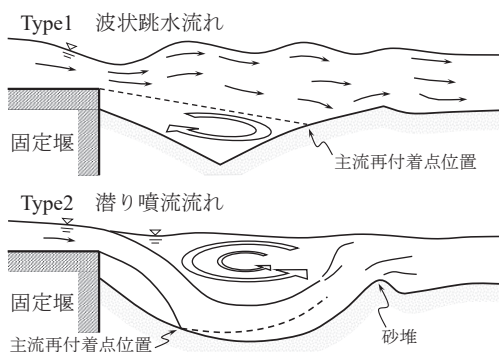


図2 堰下流部における流れと局所洗掘現象

ものと推定されている。そのため、本震災以降、容易に堤防が決壊しないような「粘り強く機能を発揮する」構造を備えた海岸堤防の技術開発・整備が進められてきた。この「粘り強い機能」とは、堤防天端被覆工の補強および裏法面・法尻部の強化により津波が堤防を越流した場合にも容易には決壊せず、背後地住人の避難時間を確保するとともに、浸水深・浸水面積を少しでも減らす機能を意味している<sup>3)</sup>。このような機能を評価するためには、津波の堤防越流時に発生し得る現象を詳細に把握しておく必要があり、特に、堤防被災の主要因となった裏法尻での洗掘メカニズムを把握しておくことが極めて重要である。そのため、従来、津波の堤防越流に伴う局所洗掘現象に関して数多くの研究が行われてきた<sup>1,4-9)</sup>。

従来、津波の堤防越流による裏法尻での局所洗掘現象については、実験的<sup>1,4-6)</sup>に、また数値解析的<sup>7-9)</sup>に数多くの研究が行われてきた。三戸部ら<sup>5)</sup>による実験的研究では、図1に示す裏法尻で発生する局所洗掘現象において、堤防法面を流下してきた高速流が水面付近を波状となって流れ、その高速流が底面に再付着する位置で洗掘が進行するType1「跳水型」と、堤防法面を流下してきた高速流がそのまま洗掘孔内に流入し、急激に洗掘が進行するType2「潜水型」が交互に発生する様子が確認されている。このような複雑な局所洗掘現象に対し、中村・水谷<sup>8,9)</sup>による数値解析的研究では、水面位置の決定にVOF法を採用し、同時に地盤の浸透流出流を考慮した解析モデルにより、

両流況の移行過程およびその洗掘現象を良好に再現できることを示している。

ところで、河川における堰や床止め直下流部で発生する局所洗掘現象も、水理条件によっては津波越流による洗掘現象とほぼ同様の様相を呈する。図2は堰直下で発生する局所洗掘現象の模式図を示している。堰直下では堰上で支配断面が形成されるような流れの場合、Type1「波状跳水流れ」とType2「潜り噴流流れ」とが交互に移行を繰り返しながら洗掘が進行する極めて複雑な局所洗掘現象が発生する。図1との比較からも分かるように、両現象はほぼ同一である。従来、著者らは河川における当洗掘現象を対象にその高精度予測を目的として数値解析モデルの開発を進めてきた<sup>10,11)</sup>。著者らの解析モデルでは、水面位置を水深積分された連続式より算定し、また地盤の浸透流出流も考慮していない比較的簡易なモデルである。しかしながら、本モデルは両流況の移行過程、移行条件、および洗掘孔形状も含めて良好に現象を再現できることが示されている。したがって、本モデルが津波越流による局所洗掘現象にも適用可能であれば、より実用的な洗掘予測モデルになり得ると考えられる。

また、堤防裏法尻で発生する局所洗掘現象では、Type2「潜水型」の流況発生時に地盤の土砂が巻き上げられるため、その流砂運動は極めて複雑となる<sup>4,5)</sup>。したがって、洗掘解析において浮遊砂を考慮することは勿論、掃流砂に対しても非平衡流砂モデルを適用することが望ましい。しかしな

がら、従来提案されている数値解析モデル<sup>7-9)</sup>では、地形変化解析における掃流砂の取扱いに平衡流砂モデルを適用したものが殆どであり、非平衡流砂モデルを適用した例は見られない。そのため、当該現象の再現性に対する掃流砂の平衡・非平衡性が及ぼす影響についても明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、従来著者ら<sup>10,11)</sup>が開発を進めてきた数値解析モデルを使用し、津波の海岸堤防越流時に発生する局所洗掘現象への適用性を明らかにするとともに、掃流砂に対する平衡・非平衡流砂モデルの適用から、流砂モデルの違いが当該現象の再現性へ及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 2. 数値解析モデル

本研究では、沿岸方向に一様に設置された海岸堤防に対し、津波は沖方向から堤防に垂直に流入すると考え、解析は鉛直二次元モデルとした。

### 2.1 津波流の基礎方程式

本解析モデルでは、座標系にデカルト座標系を採用し、当該座標系に沿わない堤防形状および洗掘孔形状でも適切に境界条件を課せるよう、基礎方程式に FAVOR 法<sup>10-12)</sup>を導入した。鉛直二次元断面における FAVOR 法を導入した連続式および運動方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial A_x u}{\partial x} + \frac{\partial A_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial A_x u u}{\partial x} + \frac{\partial A_z w u}{\partial z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ &+ \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial A_x u w}{\partial x} + \frac{\partial A_z w w}{\partial z} \right] &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \\ &+ \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $t$ ：時間、 $(x, z)$ ：流下方向および鉛直方向座標軸、 $V$ ：格子内において流体の占める体積率、 $(A_x, A_z)$ ：それぞれ  $(x, z)$  方向の格子面で流体が透過可能な面積率、 $(u, w)$ ：それぞれ  $(x, z)$  方向流速、 $\rho$ ：流体の密度、 $g$ ：重力加速度、 $P = p + 2/3 \rho k$ 、 $p$ ：圧力、 $k$ ：乱流エネルギー、 $v_e = v + v_t$ 、 $v$ ：動粘性係数、 $v_t$ ：渦動粘性係数である。

渦動粘性係数  $v_t$  は、以下の FAVOR 法を導入した標準型  $k-\varepsilon$  モデルにより評価した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial A_x u k}{\partial x} + \frac{\partial A_z w k}{\partial z} \right] &= G_s - \varepsilon \\ &+ \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x v_k \left( \frac{\partial k}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_z v_k \left( \frac{\partial k}{\partial z} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial A_x u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial A_z w \varepsilon}{\partial z} \right] &= C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \\ &+ \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x v_\varepsilon \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_z v_\varepsilon \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \right] \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$G_s = v_t \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; v_k = v + \frac{v_t}{\sigma_k}; v_\varepsilon = v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (7)$$

ここに、 $G_s$ ：ひずみエネルギー、 $\varepsilon$ ：乱流エネルギー散逸率である。(5)式および(7)式におけるモデル定数には、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $C_1 = 1.44$ 、 $C_2 = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ を用いた。

また、水深(水面位置)の算定には、(1)式を底面から水面まで鉛直積分した次式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{A_{zs}} \frac{\partial}{\partial x} \int_\delta^{\eta} A_x u dz = 0 \quad (8)$$

ここに、 $h$ ：水深、 $A_{zs}$ ：水面での面積率  $A_z$ 、 $\delta$  および  $\eta$ ：それぞれ底面および水面の  $z$  座標である。

### 2.2 平衡流砂モデルの基礎方程式

掃流砂に対して平衡流砂モデルを適用し、浮遊砂も考慮した流砂の連続式は次のように表される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial q_B}{\partial x} + q_{su} - w_f c_b \right) = 0 \quad (9)$$

ここに、 $z_b$ ：地盤高、 $\lambda$ ：地盤の間隙率、 $q_B$ ：掃流砂量、 $q_{su}$ ：浮遊砂浮上量、 $w_f$ ：Rubey式<sup>13)</sup>より求まる砂粒子の沈降速度、 $c_b$ ：底面最近傍格子での浮遊砂濃度である。

掃流砂量  $q_B$  は、後に示す非平衡流砂モデルとの比較において整合性を保つため、pick-up rate と平均 step length を用いて次式より算定する。

$$q_B = \frac{A_3}{A_2} p_s \Lambda d \quad (10)$$

ここに、 $A_2$  および  $A_3$ ：砂粒子の2次元、3次元形状係数 ( $=\pi/4$ ,  $\pi/6$ )、 $p_s$ ：pick-up rate、 $\Lambda$ ：平均 step length、 $d$ ：砂粒子の粒径である。

Pick-up rate の算定には中川ら<sup>14)</sup>による次式を採用し、平均 step length は Einstein<sup>15)</sup>の提案式より評価した。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho - 1)g}} = 0.03 \tau_* \left( 1 - \frac{0.7\Phi\tau_*}{\tau_*} \right)^3 \quad (11)$$

$$\Phi = (\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \gamma) / \mu_s \quad (12)$$

ここに、 $\sigma$ ：砂粒子の密度、 $\tau_*$ ：無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ ：岩垣式<sup>16)</sup>より求められる無次元限界掃流力、 $\mu_s$ ：砂の静止摩擦係数 ( $=0.7$ )、 $\theta_b$ ：地盤の傾斜角、 $\gamma$ ：砂粒子の移動方向と地盤傾斜方向のなす角である。

浮遊砂浮上量  $q_{su}$  の算定には、津波流に対して適用実績のある池野ら<sup>17)</sup>の提案式を採用した。

$$q_{su} = A \left( \frac{v^2}{sgd^3} \right)^{0.2} \left[ \left( \frac{w_f}{\sqrt{sgd}} \right)^{0.8} (\tau_* - \tau_{*c}) \right]^2 \sqrt{sgd} \quad (13)$$

ここに、 $A$ ：係数、 $s$ ：砂粒子の水中比重 ( $=\sigma/\rho - 1$ ) である。係数  $A$  について、藤井ら<sup>18)</sup>は  $A=0.15$  が最適としているが、大久保ら<sup>7)</sup>は  $A=2.0$  としており、定まった値とはなっていない。そのため、本研究でも  $A$  の値を種々変更し検討を進めた。

## 2.3 非平衡流砂モデルの基礎方程式

掃流砂の非平衡性を考慮し、また浮遊砂も考慮した非平衡流砂モデルによる流砂の連続式は次のように表される。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{A_3}{A_2} d (p_s - p_d) + q_{su} - w_f c_b \right] = 0 \quad (14)$$

ここに、 $p_d$ ：deposit rate である。

Pick-up rate の算定には、中川ら<sup>14)</sup>による(11)式を用いた。砂粒子群の移動については、砂粒子の運動方程式は解かず、pick-up 地点の底面流速方向へ輸送されるものとした。また、deposit rate は、pick-up された砂粒子群が次式に示される step length の確率密度関数に従って堆積するとして計算した。

$$f_s(s) = \frac{1}{\Lambda} \exp\left(-\frac{l}{\Lambda}\right) \quad (15)$$

ここに、 $f_s(s)$ ：step length の確率密度関数、 $l$ ：砂粒子が pick-up された地点からの距離である。

ここで、deposit rate 算定の際、ある地点での掃流力が限界掃流力以下となった場合、その地点で砂粒子群は停止すると考え、pick-up されている残りの土砂量全てをその地点に堆積させた。

## 2.4 浮遊砂濃度の連続式

浮遊砂濃度  $c$  の移流拡散は、以下の FAVOR 法を導入した浮遊砂濃度の連続式より算定した。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial A_x u c}{\partial x} + \frac{\partial A_z w c}{\partial z} \right] + \frac{1}{V} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_x D_t \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_z D_t \left( \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] \right] \quad (16)$$

ここに、 $c$ ：浮遊砂濃度、 $D_t$ ：渦拡散係数 ( $=v_t/\sigma_t$ )、 $\sigma_t$ ：乱流シュミット数 ( $=0.8$ ) である。

## 2.5 数値解析法

数値解析法として、津波流の計算では計算格子にコロケート格子を採用し、(2)-(3)式の運動方程式の移流項には WENO 法<sup>19)</sup>を、圧力場の

計算には C-HSMAC 法<sup>20)</sup>を適用した。(4)-(5) 式の  $k-\epsilon$  モデルおよび (16) 式の浮遊砂濃度連続式の離散化には hybrid 法を適用した。時間積分には Euler 法を適用し、津波流および洗掘解析とも同じ計算時間間隔で時間進行させた。

境界条件として、上流端では所定の流量となるよう鉛直方向に対数則に従う流速分布を与え、土砂の流入は後述の対象実験と同じくゼロ (給砂無し) の条件とした。下流端では、水深について、流れが射流の場合は自由流出とし、常流の場合は限界水深を与えた。流速はゾンマーフェルトの放射条件<sup>21)</sup>により流出させた。土砂については、下流端でその場の底面せん断力に応じた平衡流砂量を算定し、流出させた。固定床と移動床とが混在する場合には、その場に存在する土砂量以上の流砂量は発生しないものとして、流砂量を補正した。底面および壁面では対数則より摩擦速度を評価し、乱流量は壁法則を適用した。水面では流れおよび乱流量とも slip 条件とした。また、洗掘解析において、洗掘孔斜面が水中安息角よりも急となった場合、瞬時に土砂を崩落させ水中安息角を保つよう勾配補正を行った。

### 3. 数値解析モデルの水理模型実験への適用

本研究では、大久保ら<sup>7)</sup>および中村・水谷<sup>8)</sup>と同様に、鳩貝ら<sup>1)</sup>および加藤ら<sup>4)</sup>より行われた水理模型実験を対象とした。

#### 3.1 対象実験の概要と計算条件

図3に、鳩貝ら<sup>1)</sup>および加藤ら<sup>4)</sup>により行われた縮尺1/25の水理模型実験をモデル化した計算領域の概略図を示す。本研究では、比高0.36 m、

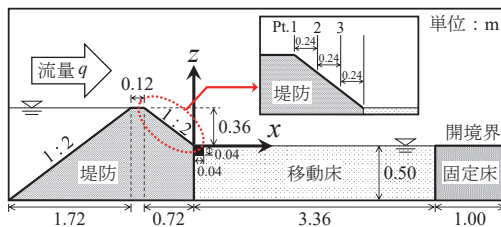


図3 計算領域の概略図

天端幅0.12 m、表法面および裏法面ともに2割勾配の海岸堤防条件を対象とした。移動床部では、平均粒径0.3 mm、砂粒子密度2,700 kg/m<sup>3</sup>の砂が平坦に敷詰められ、裏法尻には0.04 m角の不透過な基礎工が設置された。

実験<sup>1,4)</sup>では越流水深を0.04~0.40 mの範囲で5パターン変化させた検討が行われているが、本研究では越流現象に対する再現性の検討において越流水深0.04~0.24 mの範囲における4ケース、および洗掘現象に対する再現性の検討において越流水深0.04~0.12 mの3ケースを対象とした。ここで、越流水深0.24 mを対象とした洗掘解析では、洗掘進行時における Type1「跳水型」と Type2「潜水型」(図1参照)による流れの移行現象が激しく、ピーク流量発生前後で解析が発散した。そのため、検討ケースから除外した。後述の表1に示す計算時間間隔  $\Delta t$  をより小さく設定することで解析できる可能性もあるが、その場合、計算時間が大幅に増加してしまう。越流水深0.24 mのケースについては、解析の安定性および計算時間の短縮も踏まえて、今後の検討課題である。

計算条件を表1に、越流水深ごとの流量ハイドログラフを図4にそれぞれ示す。表1に示される

表1 計算条件

計算格子間隔	水平方向 $\Delta x$ (m)	0.0100
	鉛直方向 $\Delta z$ (m)	0.0033
計算時間間隔 $\Delta t$ (s)	越流水深 0.04 m, 0.08 m	$1.0 \times 10^{-4}$
	越流水深 0.12 m, 0.24 m	$5.0 \times 10^{-5}$
マンニングの粗度係数 $n$ (m <sup>-1/3</sup> s)	固定床	0.0115
	移動床	0.0126
砂粒子の粒径 $d$ (mm)		0.30
砂粒子の密度 $\sigma$ (kg/m <sup>3</sup> )		2,700
移動床間隙率 $\lambda$		0.40
水中安息角 (°)		32.0

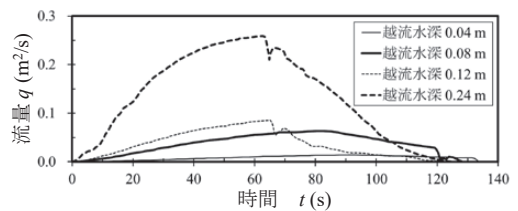


図4 越流水深ごとの流量ハイドログラフ

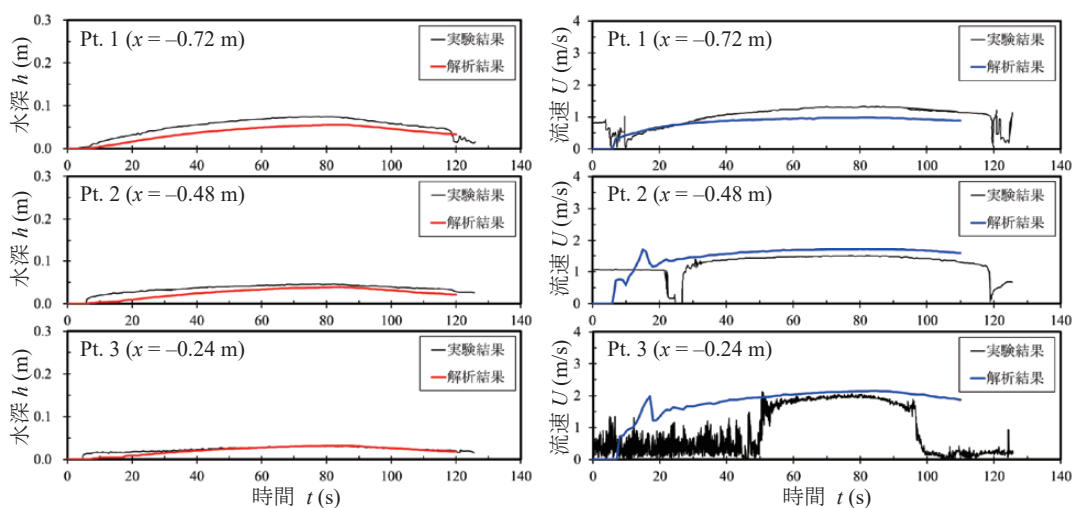
計算時間間隔  $\Delta t$  は、対象とする越流水深によって発生する最大流速が異なるため変化させている。また、実験において流量は計測されておらず、越流水深の時間変化のみが計測されている<sup>4)</sup>。そのため、図4に示される流量ハイドログラフは中村・水谷<sup>8)</sup>に倣い、広頂堰に対する完全越流公式より作成した。

### 3.2 越流現象に関する解析結果と考察

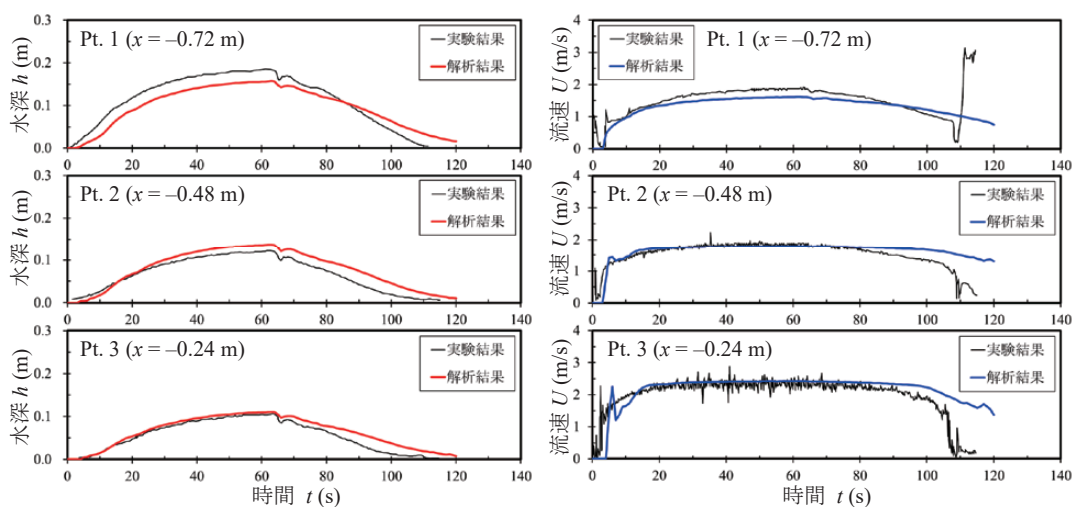
越流現象の再現性検討として、中村・水谷<sup>8)</sup>と

同様に、図5に(a)越流水深0.08 mおよび(b)越流水深0.24 mにおけるPt.1~3(図1参照)での水深と流速の時間変化の比較をそれぞれ示す。ここで、流速の比較について、実験では底面から固定された任意の高さでの流速値であるのに対し、解析は断面平均流速を示しており、完全に正確な比較とはなっていない点にも注意されたい。

図5より、両越流水深のPt.1において、解析による水深は実験値よりも若干低めの値となっている。後述の図6を見ると、ピーク流量時の水面



(a) 越流水深0.08 m



(b) 越流水深0.24 m

図5 水深および流速に関する実験値と計算値との比較

形は良好に一致している。そのため、Pt.1 での水深の差は、実験における計測点と解析における結果出力点とが十分一致していなかった可能性がある。図 6 の Pt.1 裏法肩付近を見ると、ここでは水深の変化が非常に大きい。従って、比較位置が僅かに異なるだけでも水深の差は大きくなる。結果、その差が図 5 に表れたのではないかと考えられる。

一方、図 5 における Pt.1 より下流側の Pt.2 から裏法尻の Pt.3 に近づくにつれ、解析値と実験値がほぼ一致している様子が分かる。流速に着目すると、先に述べたように実験と解析では完全に同条件での比較は難しいものの、解析結果は概ね実験結果を再現できています。特に、洗掘予測で重要となる裏法尻側の Pt.3 に近づくに従い、水深の結果と同様、実験値と解析値はほぼ一致していることが分かる。中村・水谷<sup>8)</sup>による解析では、堤防法面も直交格子で表現していたため、流況を

再現するために法面傾斜に沿った重力加速度を考慮する必要があった。しかしながら、本解析モデルでは直交格子を採用しつつも基礎方程式に FAVOR 法<sup>12)</sup>を導入し、格子面の透過可能面積率により直交格子内の斜面の存在を考慮していることから、斜面に沿った重力加速度を考慮せずとも流況を十分再現できたと考えられる。

また、図 6 は移動床部を固定床条件とした場合におけるピーク流量時の (a) 水位縦断分布と (b) 流速分布の比較を示している。図 6 より、全ての越流水深条件に対して解析値は実験値<sup>9)</sup>と良好に一致していることが分かる。

以上より、本解析モデルは堤防天端付近での水深を若干低く評価する可能性があるものの、裏法尻から先の洗掘現象の再現で重要となる裏法尻付近の水深および流速については十分再現可能であることが示された。

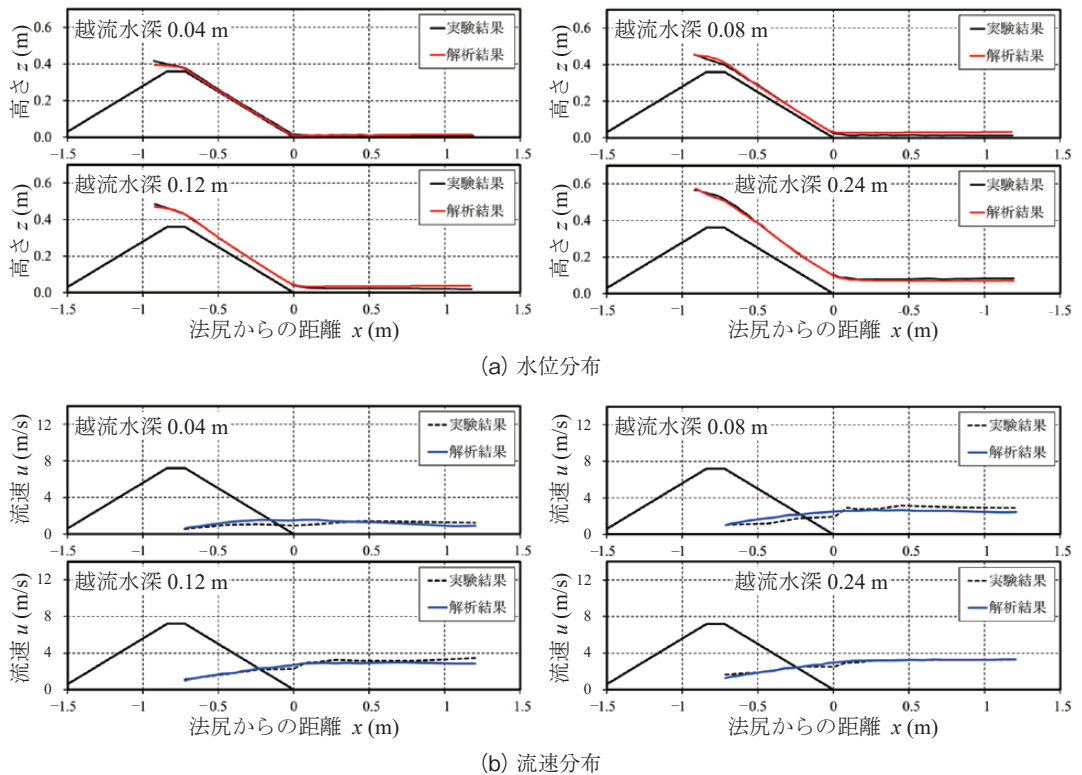


図 6 ピーク流量時における各越流水深での水位分布および流速分布の比較

### 3.3 洗掘現象に関する解析結果と考察

#### (1) 越流水深0.04 mを対象とした解析

越流水深0.04 mを対象とした解析結果として、図7に平衡および非平衡流砂モデルによる(a)掃流砂のみを考慮した場合、および(b)掃流砂および浮遊砂の両者を考慮した場合における洗掘孔形状の比較をそれぞれ示す。ここで、図7(b)の解析結果は、(13)式における浮遊砂浮上量に関する係数を、藤井ら<sup>18)</sup>に倣い $A=0.15$ とした結果である。

まず、図7(a)より、実験では基礎工の岸側上面から滑らかな傾斜による洗掘孔が形成され、その洗掘孔の広がりには約0.5 mとなっている。掃流砂のみを考慮した平衡流砂モデルによる解析結果を見ると、実験とは大きく異なり、基礎工直下に急な深掘れが形成されている。また、洗掘孔の広がりも約0.3 mと実験に比べて小さい。平衡流砂モデルで基礎工直下に深掘れが形成される様子は、大久保ら<sup>7)</sup>による解析結果にも表れている。一方、非平衡流砂モデルによる解析結果を見ると、洗掘孔の広がりには約0.3 mであり、平衡流砂モデルと同程度であった。しかしながら、その洗掘孔

形状は実験結果により近く、基礎工の岸側上面から傾斜の緩やかな洗掘孔が形成されている様子が分かる。

浮遊砂も考慮した図7(b)を見ると、平衡流砂モデルでは最大洗掘深が0.128 mとなり、実験値(0.053 m)の2倍以上にまで発達した。洗掘孔の広がりには約0.4 mにまで拡大したものの、依然として実験値より小さい。一方、非平衡流砂モデルでは、洗掘孔の広がりには約0.4 mと平衡流砂モデルとほぼ同様であり、同じく実験値よりも小さく再現された。しかしながら、最大洗掘深は0.080 mと実験値より若干大きいものの、平衡流砂モデルと比較してもかなり実験値に近づいており、洗掘孔形状も比較的实验に近い。

このように、平衡および非平衡流砂モデルで解析結果に違いが表れた原因は、平衡流砂モデルではその場(その格子)における掃流力および底面流速方向のみから掃流砂量およびその移動方向が決定されるのに対し、非平衡流砂モデルではその場の流砂量あるいは堆積量は、上流からの流れと流砂運動の履歴を受けたものとして考えているためである。先の図1に示したように、洗掘孔内で

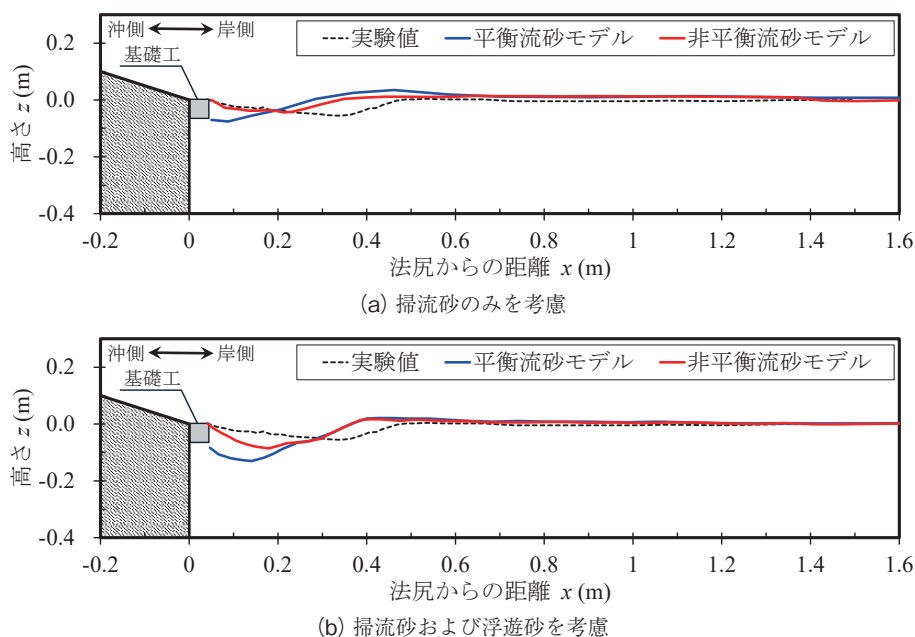


図7 流砂モデルの違いによる洗掘孔形状の比較(越流水深0.04 m)



は跳水型あるいは潜水型の流れが発生し、空間的に流れが加速・減速している。そのため、流砂の運動もその場の掃流力だけで決まるものではない。本解析における非平衡流砂モデルは流砂の運動方程式を厳密に解いているわけではないため、その運動履歴を十分に評価したものではない。しかしながら、その場の流砂量あるいは堆積量は上流からの影響を考慮したものとなっている。したがって、非平衡流砂モデルによる解析結果の方が平衡流砂モデルに比べ、より実験結果を再現できたものと考えられる。また、図7 (a) および (b) の比較から分かるように、越流水深0.04 mの本ケースでは、局所洗掘に対する浮遊砂の影響度合いが比較的小さい。この点も、流砂モデルの違いによる結果への影響が現れ易くなった要因として考えられる。

以上、海岸堤防越流に伴う裏法尻での局所洗掘解析において、越流規模が比較的小さく掃流砂の影響が卓越する条件の場合、掃流砂の取扱いに非平衡流砂モデルを適用した方が現象の再現性が高いことが分かった。

(2) 越流水深0.08 mを対象とした解析

越流水深0.08 mを対象とした解析結果として、まず、図8に掃流砂のみを考慮した場合における流砂モデルの違いによる洗掘孔形状の比較を示す。ここで、図8中には実験値1～3が示されているが、これは実験水路幅1 mにおいて異なる縦断測線での結果である。

図8から分かるように、先の越流水深0.04 mの図7と同様、実験では基礎工の岸側上面から滑らかな傾斜による洗掘孔が形成されているのに対し、平衡流砂モデルでは基礎工直下に深掘れが発生している。一方の非平衡流砂モデルでは、実験と同様の滑らかな洗掘孔形状が再現できている。しかしながら、掃流砂のみの考慮では、両者とも実験の洗掘孔規模をかなり小さく再現している。

そこで、再現性の良かった非平衡流砂モデル、および(13)式の浮遊砂浮上量に係る係数を先程と同様<sup>18)</sup>の $A=0.15$ として浮遊砂も考慮した解析結果を図9に示す。図9より、(13)式の係数 $A=0.15$ のままでは、最大洗掘深および洗掘孔をかなり過大に評価していることが分かる。そこで、係数 $A$ を変更させた結果を同じく図9に示す。

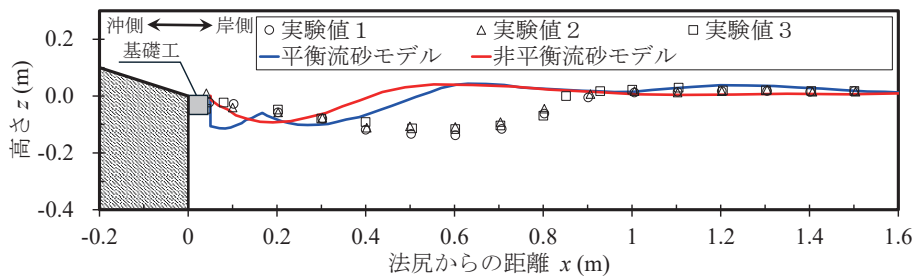


図8 掃流砂のみを考慮した流砂モデルの違いによる洗掘孔形状の比較 (越流水深0.08 m)

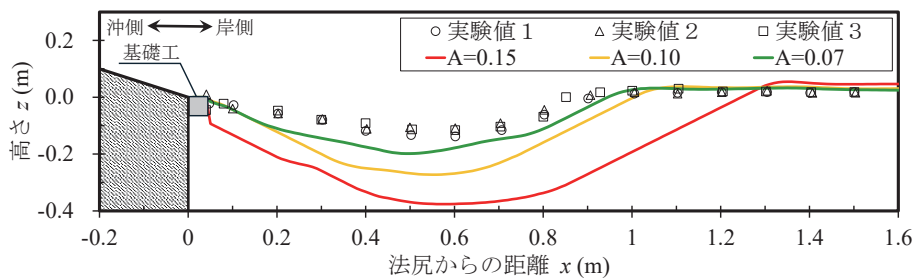


図9 浮遊砂量係数の違いによる洗掘孔形状の比較 (越流水深0.08 m)

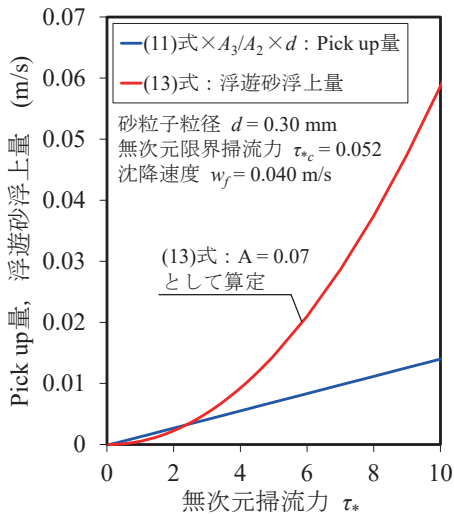


図10 無次元掃流力に対する Pick up 量および浮遊砂浮上量の変化

$A=0.07$ としたとき、概ね実験結果と一致した。大久保ら<sup>7)</sup>も係数  $A$  を実験値に適合するよう変更させているが、本現象の予測において越流水深ごとに係数  $A$  を変更させることは事実上困難である。本研究では浮遊砂浮上量式として池野ら<sup>17)</sup>による(13)式を採用したが、今後は種々の浮遊砂浮上量式を含めての検討が必要である。

また、図8と図9との比較から分かるように、越流水深0.08 mの本ケースでは、掃流砂よりも浮遊砂の方が局所洗掘への影響度合いが大きい。図10は無次元限界掃流力  $\tau_*$  に対する Pick up 量および浮遊砂浮上量の変化を示している。越流水深0.08 mではピーク流量時の  $\tau_*$  は6.0程度になるが、図10より、 $\tau_*=6.0$ のとき浮遊砂浮上量の方が

Pick up 量を大きく上回っていることが分かる。そのため、流砂の移動形態として掃流砂ではなく浮遊砂が卓越し、浮遊砂考慮の有無によって洗掘規模が大きく異なったものと考えられる。

浮遊砂が卓越する本ケースのような場合、ピーク流量時における局所洗掘への掃流砂の非平衡性考慮の寄与度も小さくなると考えられる。しかしながら、図4に示したハイドログラフのように、津波の堤防越流現象では越流流量が大きく変動する。そのため、ピーク流量時には掃流砂が寄与せずとも、ハイドログラフの形状によっては越流開始時および越流終了時付近で掃流砂が卓越し、掃流砂の非平衡性考慮の有無がその局所洗掘に影響する可能性は十分にある。本研究では、越流水深0.08 mの本ケースに対し、浮遊砂の卓越が明白であったため、平衡流砂モデルで浮遊砂を考慮した解析までは行っていない。今後、流量ハイドログラフの形状変更に加えて、掃流砂の平衡・非平衡性を考慮した検討が必要である。

### (3) 越流水深0.12 mを対象とした解析

越流水深0.12 mを対象とし、非平衡流砂および浮遊砂を考慮した解析モデルによる洗掘孔形状の解析結果および実験結果の比較を図11に示す。ここで、(13)式の浮遊砂浮上量に係る係数は、前項(2)で妥当性の得られた  $A=0.07$  を使用した。

図11より、実験では基礎工直下において約0.1 mほど低下した位置にまで洗掘が進行し、 $x=0.45$  m付近で最大洗掘深0.190 mが発生している。また、洗掘孔の広がりには約0.95 mあたりまで達している。解析結果を見ると、基礎工直下での洗掘が再現できていない。これは、実験と同様の流況を

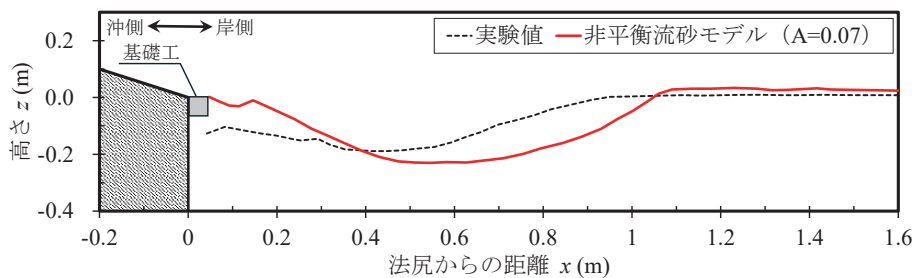


図11 洗掘孔形状の比較(越流水深0.12 m)

再現できなかった可能性も一因として考えられるが、解析では砂地盤への流体の浸透滲出流を考慮していないことが特に大きな要因として考えられる。すなわち、実験において基礎工の鉛直下方は砂層であり、そこでも流体の浸透・滲出が発生する。そして、全体的な洗掘が進行すると間隙水圧の変動もあり、基礎工下方の砂が吸出しのような

形で移動し易くなる。事実、中村・水谷<sup>8)</sup>は地盤内および基礎工下方への浸透滲出流を考慮することで、基礎工直下の洗掘が再現できることを示している。本解析モデルでは基礎工下方は勿論のこと、砂層全体への浸透滲出流を考慮していない。そのため、基礎工直下での洗掘を再現できなかったものと考えられる。

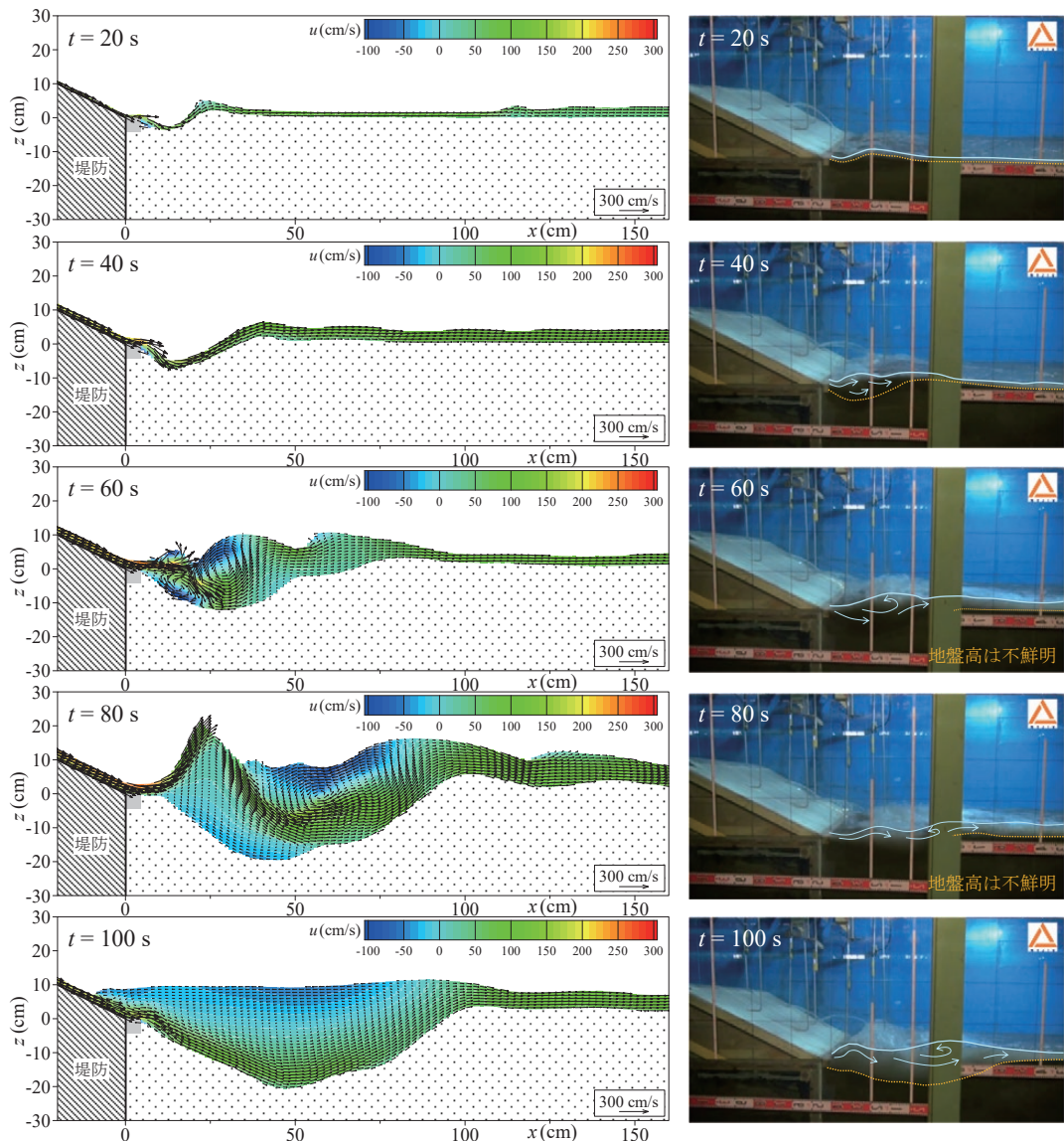


図12 越流水深0.08 mにおける局所洗掘進展の様子(左:計算結果, 右:実験結果<sup>22)</sup>) [実験結果<sup>22)</sup>における流況・地盤高は著者らが加筆]

一方、解析による洗掘孔の広がりを見ると、約1.10 mと実験より0.15 m程度大きく、最大洗掘深の発生位置も約 $x=0.65$  mと実験より0.20 m程度岸側に位置している。しかしながら、解析による最大洗掘深は0.241 mと概ね実験値と一致しており、全体的に滑らかな洗掘孔形状もほぼ実験結果を再現できている。基礎工の無い条件であれば、本解析モデルでも十分にこの局所洗掘現象を再現できる可能性がある。

以上、越流水深0.12 mを対象とした解析では浮遊砂の卓越が十分に予想されたため、掃流砂の非平衡性考慮の有無による検討までは実施していない。しかしながら、前項(2)でも述べたように、流量ハイドログラフの形状によっては浮遊砂が卓越する条件であっても、越流開始時および越流終了時付近で掃流砂の非平衡性がその局所洗掘に影響を及ぼす可能性が考えられる。したがって、大きな越流水深条件であっても、流量ハイドログラフの形状を変更した検討が必要である。

#### (4) 局所洗掘進展時の流況について

図12に越流水深0.08 mにおける局所洗掘進展時の解析結果(非平衡流砂モデル&(13)式の係数 $A=0.07$ )と実験結果との比較を示す。実験結果を見ると、 $t=40$  sまでは堤防法面に沿って流下してきた高速流が移動床表面を流れ、法尻で洗掘を生じさせている様子が分かる。 $t=60\sim 80$  sにかけては「跳水型」と「潜水型」が混在または移行を繰り返しながら洗掘が進行し、 $t=80$  s以降はほぼ「跳水型」で進行した。解析結果を見ると、 $t=100$  sでは「潜水型」となっているものの、 $t=20\sim 40$  sにかけての移動床表層での高速流による洗掘、また $t=60\sim 80$  sにかけての「跳水型」と「潜水型」の移行を繰り返しながらの洗掘進展の様子を良好に再現できている。

以上のように、本解析モデルは水面位置を水深積分された連続式より求めているものの、その複雑な水面形状、および流れの移行を繰り返しながら洗掘が進行する様子を良好に再現できることが分かった。

## 4. おわりに

本研究では、従来著者ら<sup>10,11)</sup>が開発を進めてきた河川分野における堰下流部の局所洗掘現象を対象とした数値解析モデルについて、津波の海岸堤防越流により発生する裏法尻での局所洗掘現象への適用性と、掃流砂に対する平衡・非平衡流砂モデルの違いによる当該洗掘現象の再現性に及ぼす影響について検討した。以下に本研究で得られた成果を纏める。

- (1) 本解析モデルを津波の海岸堤防越流現象に適用した。その結果、水深については天端付近で実験との差が見られたものの、本解析モデルは洗掘予測で重要となる裏法尻近傍の流況、およびピーク流量時の水面形と流速分布を良好に再現できることが分かった。
  - (2) 掃流砂に対して平衡および非平衡流砂モデルを適用した解析より、平衡流砂モデルでは裏法尻直下に洗掘孔が形成される傾向にあることが分かった。これは大久保ら<sup>7)</sup>による従来の解析結果と同様の傾向であった。一方、非平衡流砂モデルでは実験と同様に、基礎工上面から滑らかに延びる洗掘孔形状を再現できることが分かった。
  - (3) 越流水深を変更した局所洗掘解析から、越流水深が大きく流砂の移動形態として浮遊砂が卓越するような場合、当該洗掘現象の再現性には浮遊砂浮上量式にかかる係数が極めて大きく影響していることが分かった。ただし、堤防越流時の流量ハイドログラフの形状によっては、越流水深が大きくても、越流開始時および越流終了時付近で掃流砂の卓越する時間帯が長くなる可能性もある。その場合、最終洗掘孔形状に掃流砂の非平衡性が影響する可能性も十分考えられる。
  - (5) 本解析モデルは水面位置を水深積分された連続式より求める比較的簡易なモデルであるものの、「跳水型」および「潜水型」と大きな水位変動を繰り返しながら洗掘が進行する当現象の特徴を良好に再現できることが示された。
- 以上の成果が得られたが、越流水深が大きい場合の当該現象では基本的に浮遊砂運動が卓越して

いることが予想されるため、今後は種々の浮遊砂浮上量式による検討が必要である。また、砂地盤への流体の浸透・流出を考慮することで現象の再現性向上が期待できるが、計算負荷も大きくなるため、実用上要求される精度も含めた検討が必要である。さらに、本研究では掃流砂から浮遊砂への遷移およびその逆過程までは考慮していない。実用上は掃流砂・浮遊砂と個別での取扱いが簡便であるが、学術上では流砂運動の詳細も含めた解析が必要であり、今後の課題である。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP21K04274 の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 鳩貝聡・諏訪義雄・加藤史訓：津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_406-I\_410, 2012.
- 2) 加藤史訓・野口賢二・諏訪義雄・木村晃・河合雅史・高木利光・小俣雅志：東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_1396-I\_1400, 2012.
- 3) 国土交通省：第2回気候変動を踏まえた海岸保全の在り方検討委員会 (令和元年12月9日開催), 資料3 海岸保全に関する取組の現状 (進捗状況等), [https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/hozen/dai02kai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/hozen/dai02kai/index.html), 最終閲覧日 2024年4月1日.
- 4) 加藤史訓・諏訪義雄・鳩貝聡・藤田光一：津波の越流に対して粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.1, pp.31-49, 2014.
- 5) 三戸部佑太・Adityawan, M. B.・田中仁・河原俊哉・黒澤辰昭・乙志和孝：津波越流により生じる海岸堤防裏法尻の洗掘現象に関する実験, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.I\_1147-I\_1152, 2014.
- 6) 中村友昭・谷口淳也・趙容桓・水谷法美：越流津波による海岸堤防裏法尻の洗掘に対する蛇籠工の有効性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I\_749-I\_754, 2019.
- 7) 大久保陽介・熊谷健蔵・辻尾大樹・永澤豪・加藤史訓：津波越流時における海岸堤防の洗掘に関する数値解析モデルの構築, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I\_991-I\_995, 2014.
- 8) 中村友昭・水谷法美：海岸堤防を越流する津波と裏法尻の洗掘に関する数値解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I\_516-I\_521, 2014.
- 9) 中村友昭・水谷法美：津波の越流による海岸堤防裏法尻の洗掘に関する大規模実験の数値シミュレーション, *ながれ*, 35, pp.379-390, 2016.
- 10) 梶川勇樹・檜谷修：平衡・非平衡流砂モデルおよび DEM を用いた堰下流部における局所洗掘解析の比較, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, pp.I\_943-I\_948, 2012.
- 11) 梶川勇樹・阿波根慧：床止め下流における局所洗掘現象の進行に伴う護床工の破壊過程に関する数値計算, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.77, No.2, pp.I\_829-I\_834, 2021.
- 12) Hirt, C. W. and Sicilian, J. M.: A porosity technique for the definition obstacle in rectangular cell meshes, Proc. 4th Int. Conf. on Ship Hydrodynamics, Washington, DC, 1985.
- 13) Rubey, W. W.: Settling velocity of gravel, sand and silt particles, *Amar. Jour. Sci., Series 5*, 25, pp.325-338, 1933.
- 14) 中川博次・辻本哲郎・村上正吾：側岸における非平衡流砂過程, 第29回水理講演会論文集, pp.561-566, 1985.
- 15) Einstein, H. A.: The bed load function for sediment transportation in open channel flows, Technical Bulletin, No.1026, U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950.
- 16) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1965.
- 17) 池野正明・吉井匠・松山昌史・藤井直樹：津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定と巻上量式の提案, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.506-510, 2009.
- 18) 藤井直樹・池野正明・榊山勉・松山昌史・高尾誠・向原健：津波による港湾内の流況と地形変化に関する実験およびその数値計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.291-295, 2009.

- 19) Shu, C. W.: High-order finite difference and finite volume WENO schemes and discontinuous Galerkin methods for CFD, *Int. Jour. Comput. Fluid Dyn.*, Vol. 17, Issue 2, pp. 107-118, 2003.
- 20) 牛島省・禰津家久：移動一般座標系を用いたコロケート格子による自由水面流れの数値解析手法, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.11-19, 2002.
- 21) 吉田尚史・渡辺崇・池田敏彦：ゾンマーフェルト放射条件の対流速度についての評価, 日本計算工学会論文集, Paper No.20030017, 2003.
- 22) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室：[2] 津波・高潮 2. 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (オンライン), [http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/lab0/02\\_02.html](http://www.nilim.go.jp/lab/fcg/lab0/02_02.html), 最終閲覧日2024年6月18日.

(投稿受理：2024年4月3日  
訂正稿受理：2024年6月21日)

## 要 旨

本研究では、津波の海岸堤防越流に伴い発生する裏法尻での局所洗掘現象に対し、従来著者らが河川分野で開発を進めてきた堰下流部における局所洗掘現象を対象とした数値解析モデルの適用性と、掃流砂に対する平衡および非平衡流砂モデルの違いが当該現象の再現性に及ぼす影響について検討した。その結果、本解析モデルは堤防越流流れおよび流況の移行を繰り返しながら洗掘が進行する様子を良好に再現できることを示した。また、平衡流砂モデルでは法尻直下に深掘れが発生するのに対し、非平衡流砂モデルでは実験同様の基礎工上面から延びる滑らかな洗掘孔形状を再現できることが分かった。さらに、越流水深が大きく、浮遊砂が卓越する場合の当該洗掘現象の再現には、浮遊砂浮上量式にかかる係数が大きく影響していることも明らかにされた。